

4.9 Bildung und Degradierung von Permafrost in der sibirischen Arktis

LUTZ SCHIRRMEISTER & VOLKER RACHOLD

Formation and degradation of permafrost in the Siberian Arctic: The relief of the terrestrial, non-glaciated Polar regions is mainly controlled by permafrost and nival processes and landforms are connected to the formation or degradation of permafrost. Ice-rich permafrost is very sensitive to climate warming which results in degradation processes, such as thermokarst, thermoerosion and coastal retreat, that cause land loss, thaw consolidation and pond and lake development. Anthropogenic activities lead to an additional destabilization of the thermal equilibrium of the permafrost soils affecting the stability of constructions and buildings. Predicted climate warming will cause increases in soil temperature and active layer thickness. The concurrent increase in precipitation or melt water enrichment will further intensify thermokarst processes and thaw consolidation and will result in the formation of bogs and swamps.

Das Relief der terrestrischen, nicht vergletscherten Polargebiete der Erde (Periglazialgebiete) wird durch Permafrostprozesse und nivale (schneebedingte) Prozesse geprägt. Da Permafrost ein Klimaphänomen darstellt und mit dauerhaften negativen Bodentemperaturen aufgrund extremer Winterkälte verbunden ist (s. Kap. 1.6), reagieren diese Landschaften sehr empfindlich auf Klimaänderungen. Die natürlichen spätquartären Wärmeschwankungen haben durch den Aufbau bzw. die Zerstörung von Permafrost deutliche Spuren in den Landschaften Sibiriens hinterlassen. So hat die holozäne Klimaerwärmung zur starken Degradation von Permafrost und zum totalen Umbau der arktischen Periglaziallandschaft in Sibirien durch Thermokarst bzw. Thermoerosion geführt (Karst: Sammelbegriff für Formen an und unter der Oberfläche, die auf Lösungsvorgänge an oder in

dafür geeignete Gesteine – z.B. Kalkstein – zurückgehen).

Ein wichtiges Charakteristikum für die Existenz von Permafrost in der Arktik sind ausgedehnte Eiskeilpolygonsysteme, die große Flächen der sibirischen Tiefländer und Flussterrassen bedecken (Abb. 4.9-1). Die extreme Winterkälte führt zur Schrumpfung des gefrorenen Bodens und zum netzartigen Aufreißen von Frostspalten. Eine geringe saisonale Auftautiefe und das hohe Wasserangebot auf den schlecht drainierten Ebenen fördern die langfristige Bildung von ausgedehnten Eiskeilpolygonsystemen in eisreichen Permafrostablagerungen. Während des Pleistozäns waren diese Umweltbedingungen im arktischen und subarktischen Sibirien über viele Jahrzehntausende stabil, was zur Entstehung der sogenannten Eiskomplex-Formation führte (SCHIRRMEISTER et al. 2002). Dieser Eiskomplex bildete eine relativ geschlos-



Abb. 4.9-1: Thermokarstsenke (= Alas in jakutischer Sprache) mit Thermokarstsee (rechts, Mitte) und netzartigen Eiskeilpolygonsystemen (unten, Mitte).

E-Mail-Adresse: lschirrmeister@awi-potsdam.de

sene, wenig gegliederte und schwach zur Meeresküste oder an Talhängen geneigte Decke von bis zu 60 m Mächtigkeit. Diskontinuierliche und weitflächige Schmelzwässerabflüsse aus zahlreichen Schneefeldern, Hangprozesse und äolischer (= windbedingter) Transport formten die heute in zahlreichen Erosionsrelikten (Edoma) erhaltenen und für das Spätpleistozän Sibiriens (vor allem Jakutiens) typischen Permafrostsequenzen. Sie setzen sich aus zahlreichen begrabenen torfigen Böden und bis zu 40 m tief reichenden Eiskeilen zusammen (Abb. 4.9-2).

Mit der natürlichen Klimaerwärmung am Ende des Pleistozäns kam es zu einem ausgedehnten Tauen des Permafrostes und zu einer starken Transformation der periglazialen Landschaft und des hydrologischen Systems. Die mit einer wärme-induzierten Zerstörung des Dauerfrostbodens verbundenen Prozesse und Phänomene werden unter den Begriffen Thermokarst und Thermoerosion zusammengefasst, wobei im Fall von Thermoerosion noch die mechanische Komponente des fließenden Wassers hinzukommt. Infolge des lokalen Austauens von Permafrost und der Absenkung der Oberfläche bildeten sich zahlreiche Seesenken, die bis heute die große Regionen im Norden Sibiriens prägen. Das hydrologische Regime stellte sich von einem flächenhaften weiträumigem Abfluss auf lokal konzentrierte hydrologische Systeme um. Die Vergrößerung der Auftautiefe, das stärkere Oberflächenrelief und erhöhte Niederschläge führten im Laufe der holozänen Warmzeit zur Intensivierung der Thermoerosion, so dass heute zahlreiche Thermokarstsenken randlich radiale Talsysteme aufweisen und sich außerdem auf den relativ ebenen Edoma-Erhebungen kleine verzweigte Talsysteme

formten (Abb. 4.9-3). Sämtliche Negativformen der heutigen periglazialen Oberflächen sind Akkumulationsräume von Winterschnee. Dadurch wird die Bildung und längerfristige Konservierung von Schneefeldern gefördert. Diese Flächen sind wiederum Ausgangspunkt nivaler Prozesse, die das moderne Relief hauptsächlich gestalten (z.B. Kryoplanationsterrassen, nivale Nischen, nivale Kars). Das Schmelzwasser der austauenden Schneefelder stellt ein wesentliches Transportmedium für Sedimente dar. Im Bereich von Schneefeldern findet wegen des hohen Wasserangebots eine intensive Frostverwitterung statt und die vegetationsarmen Schneefeldareale sind häufig Ansatzpunkt für moderne Thermoerosion.

Neben den klimabedingten Prozessen der Permafrostdegradation lassen sich zahlreiche, meist lokal wirksame Zerstörungen des Permafrostes durch das Wirken des Menschen feststellen. Jegliche Störung der Oberfläche in Permafrostgebieten, wie z.B. der isolierenden Vegetationsdecke fördert das verstärkte Eindringen von Wärme in den gefrorenen Boden und stört das Wärme-, besser das Kältegleichgewicht. Jegliche Depression, und sei es nur die Spur eines Kettenfahrzeuges in der Tundra, kann zur Ansammlung von Wasser führen und Ausgangspunkt von Thermokarstprozessen werden. Gebäude und Transporttrassen stören das natürliche Drainagesystem in der saisonalen Auftauschicht und initiieren häufig einen »technogenen« Thermokarst. Schlecht isolierte Eiskeller können zum Einbruch der gefrorenen Decke und zur Entstehung sich allmählich vergrößernder Tümpel führen. Das Anlegen von Feldern kann bei Nichtbeachtung der Drainagerichtung ebenfalls zu Thermoerosion führen, wodurch

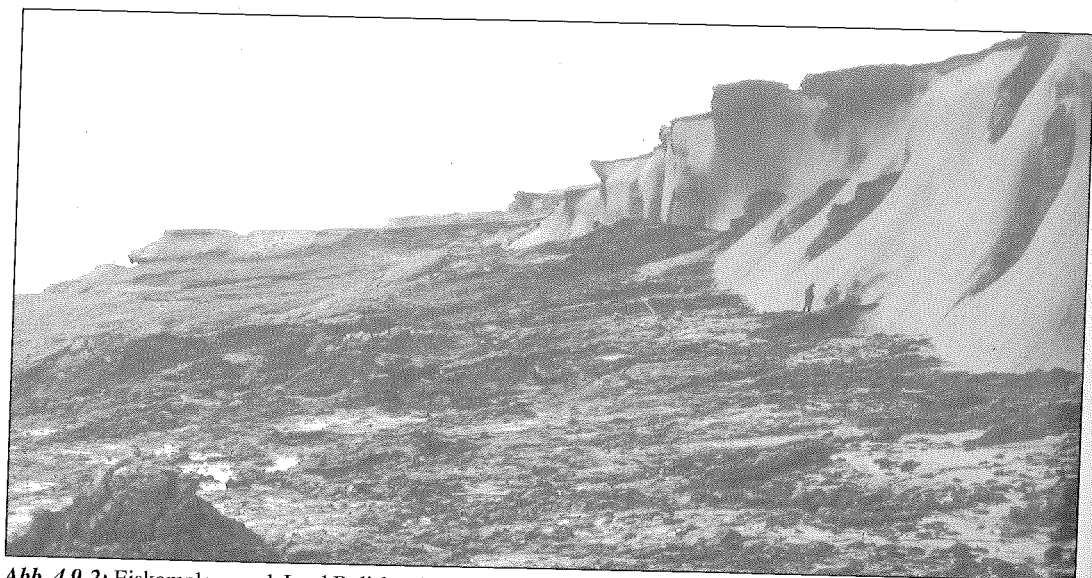


Abb. 4.9-2: Eiskomplexwand, Insel Bol'shoy Lyakhovsky.

z.B. Kartoffelfelder in der Nähe von Jakutsk innerhalb weniger Jahre in eine Fläche mit zahlreichen Thermokarsthügeln verwandelt wurden, da das unterliegende Eiskeilpolygonsystem austaute.

In Permafrostgebieten werden häufig große Anstrengungen unternommen, den Boden vor der Wärme aus Bauwerken zu schützen, sei es durch bessere Isolation, Wärmeaustauscher und den Bau von Gebäuden auf Pfeilern oder sogar das technisch aufwendige Kühlen des Untergrundes an Bauten (Abb. 4.9-4a).

Messungen der Lufttemperatur belegen im zentralen und südlichen Jakutien einen Erwärmungstrend von 1,4 bis 1,8 °C in den letzten Jahrzehnten. Daraus resultieren örtlich erhöhte Bodentemperaturen um 2–3° C. An globale Klimamodelle gekoppelte Simulationen der zukünftigen Permafrostentwicklung prognostizieren in 80 Jahren eine Reduzierung der Permafrostgebiete um 20–35% vor allem in Regionen mit fleckenhaftem Permafrost und eine Vergrößerung der Auftautiefe um 25–50% (Tab. 4.9-1).

Mit der globalen Erwärmung verstärken sich zwar nicht sofort die Thermokarstprozesse, da eine höhere und länger beständige Schneedecke isolierend auf den Permafrost wirkt. Allerdings können intensivere Sommer-niederschläge zu größeren Wasseransammlungen in Hohlformen führen, durch die Thermokarst erst entstehen

kann. Mit anderen Worten, eine Intensivierung von Thermokarst wird durch höhere Temperaturen und eine stärkere Humidität erreicht.

Permafrostküsten

Die arktische Küstenregion ist der Bereich, in dem die Permafrostablagerungen mit dem relativ warmen und salzreichen Meerwasser im Kontakt stehen (Abb. 4.9-2). Da in der geologischen Vergangenheit während Meerespiegeltiefständen weite Schelfgebiete der Arktis trocken lagen, konnte sich auch dort (insbesondere in Sibirien) Permafrost bilden, der auch heute noch nach der Überflutung dieser Gebiete als submariner Permafrost vorliegt. Die Küstenregion ist der Übergangsbereich zwischen Landpermafrost und submarinem Permafrost und das Auftauen von Permafrost, das mit einer Freisetzung von eingefrorenen Treibhausgasen verbunden sein kann, konzentriert sich auf diese Zone (s. Kap. 1.6).

Während der eisfreien Sommermonate werden die unverfestigten Permafrost-Küsten der Arktis extrem stark erodiert, der Rückgang der Küstenlinie beträgt in vielen Gebieten mehrere Meter pro Jahr. Mit dem Rückgang der Küstenlinie ist die Abtragung von Landgebieten verbunden, die als biologische Lebensräume dienen oder von Menschen besiedelt werden (Abb. 4.9-4b), so

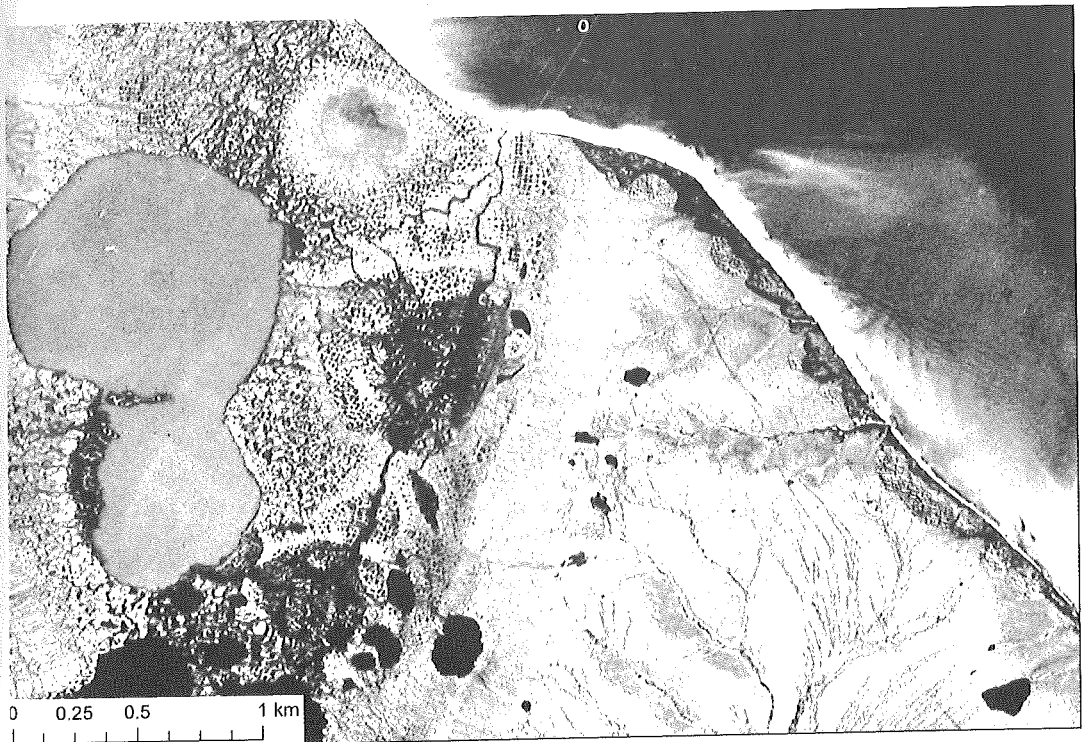


Abb. 4.9-3: Thermokarstlandschaft der Bykovsky-Halbinsel (Laptewsee) mit Thermokarstsenken, Thermoerosionstälern und Eiskeilpolygonnetzen, CORONA Satellitenbild vom Juli 1969 (GROSSE et al 2005).

dass in einigen Regionen der Arktis Maßnahmen zum Küstenschutz erforderlich sind (RACHOLD et al. 2005). Das von der Küste abgetragene Material wie Sedimente und organischer Kohlenstoff wird durch Strömungen und mit dem Meereis in das Nordpolarmeer eingetragen und liefert einen wesentlichen Beitrag zur Stoffbilanz (RACHOLD et al. 2003) – in einigen Schelfgebieten, insbesondere in Sibirien, ist der Eintrag durch Küstenerosion sogar größer als der Flusseintrag (RACHOLD et al. 2000, s. Tab. 4.9-2).

Arktische Küsten sind extrem variabel, sie können inaktiv und stabil, aber auch sehr dynamisch sein. Ihre Veränderlichkeit ist eine Funktion von Umwelteinflüssen (z.B. Wind, Wellen, Meeresspiegeländerungen, Meereis etc.) auf der einen Seite und Gestalt und geologischem Aufbau der Küste auf der anderen Seite. Die Küstendynamik in der Arktis wird insbesondere durch Arktis-spezifische Phänomene kontrolliert. Während des arktischen Winters (7–8 Monate im Jahr) wird die Küste durch eine mächtige und ausgedehnte Meereisdecke vor hydrodynamischen Einflüssen abgeschirmt. Im Sommer dagegen, insbesondere nach dem Aufbrechen der Eisdecke im

Frühjahr, bildet das Meereis ein wichtiges Transportmedium für die von der Küste erodierten Sedimente.

Die neuesten Einschätzungen zur Klima- und Umweltentwicklung zeigen deutlich, dass der Klimawandel in der Arktis besonders stark zu spüren sein wird (ACIA 2004). Die zu erwartende Erwärmung wird unmittelbar zu einer Zunahme von Thermoerosion im Küstenbereich der Arktis führen. Noch schwerwiegender allerdings könnte sich die prognostizierte Abnahme der Meereisbedeckung auf die arktischen Küsten auswirken. Zum einen sind die Permafrostküsten durch die Ausdehnung der eisfreien Saison deutlich länger, insbesondere während der sturmreichen Herbstmonate, dem erodierenden Einfluss des Meeres ausgesetzt, zum anderen führt die Ausweitung der offenen Wasserfläche dazu, dass größere Wellen entstehen können. Das komplette Abtauen des arktischen Meereises während der Sommermonate, wie es in der ACIA-Studie für das Ende dieses Jahrhunderts prognostiziert wird, könnte für Siedlungen sowie Industrie- und Förderanlagen im arktischen Küstenbereich, die bereits heute von Küstenerosion bedroht sind, katastrophale Folgen haben.

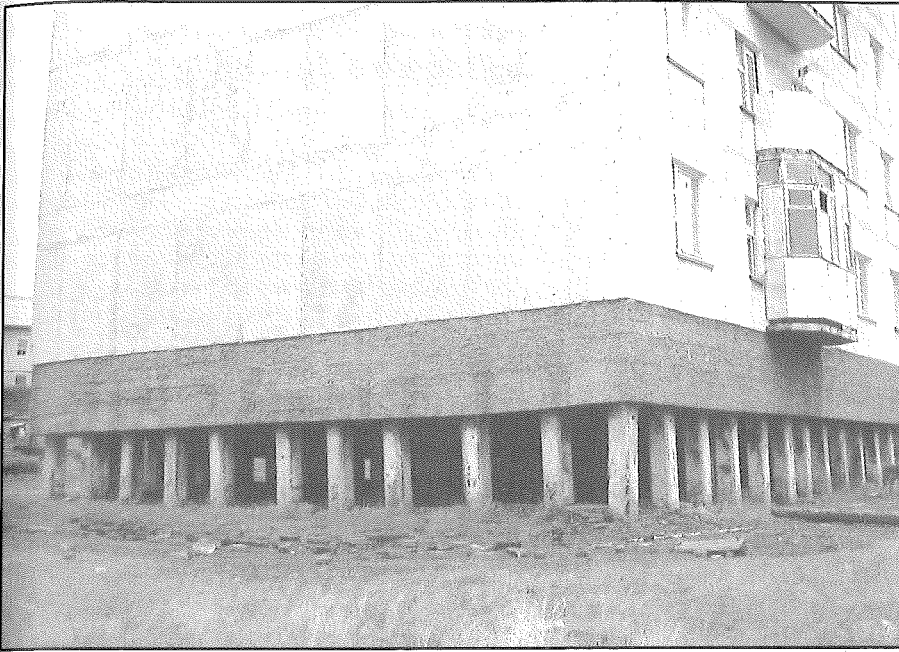
Tab. 4.9-1: Prognostizierte Erhöhungen von Luft- und Bodentemperatur sowie saisonaler Auftautiefe in den nächsten 80 Jahren für verschiedene Permafrostregionen (nach ANISIMOV & POLIAKOV 2003).

Region	$DT_a^{\circ}C$ (Luft temp.)	$DT_s^{\circ}C$ (Boden temp.)	$DZ_i\%$ (Auftautiefe)
N-Scandinavia	1,5-2,0	1,0-1,5	10-20
West Siberia	2,0-3,0	1,5-2,5	20-30
Yakutia	2,5-4,0	2,0-3,0	30-50
Russian Far East	0-0,5	0-0,5	0-20
Alaskan North Slope	2,0-3,0	1,5-2,5	25-30
Western Canada	1,5-2,5	1,0-2,0	20-30
Central Canada	2,0-3,0	1,5-2,5	30-50
NE-Canada	0-0,5	0-0,5	0-10

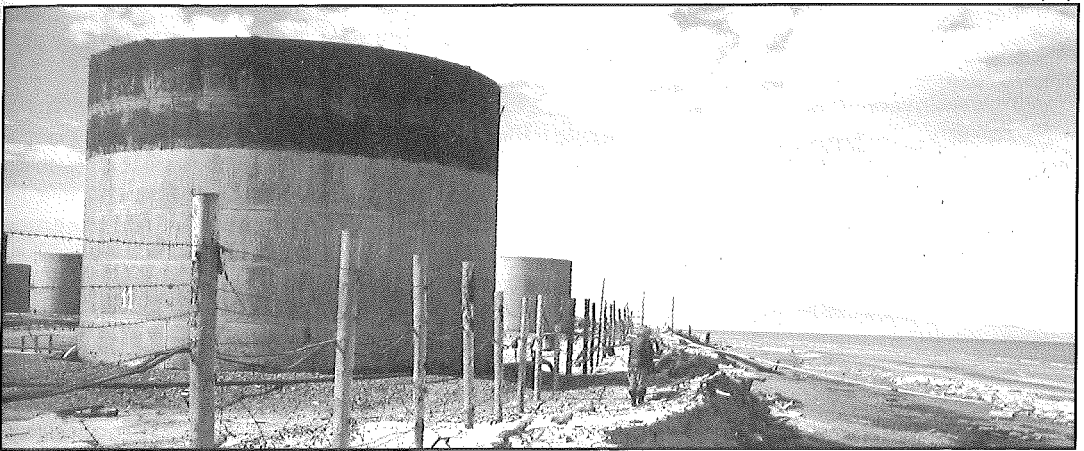
Tab. 4.9-2: Küstentypen der Lapteewsee und ihre Charakteristika bezüglich des Sediment- und Kohlenstoffeintrages (TOC = Total Organic Carbon) in das Nordpolarmeer (nach GRIGORIEV & RACHOLD 2003).

	Eiskomplex und Thermokarst-ablagerungen	Eisarme Pleistozäne und Holozäne Küsten	Festgestein und andere eisfreie Küstensedimente	Gesamte Lapteewsee
Gesamtlänge der Küste (km)	2.400	1.600	3.200	7.200
Durchschnittliche Erosionsrate (m/Jahr)	2,5	1	0,05	-
Mittlerer Eisgehalt (%)	50	20	2	-
Durchschnittliche Kliffhöhe (m)	10	5	20	-
Durchschnittliche TOC-Konz. (%)	4	1	0,3	-
Sedimenteintrag (10^6 t/Jahr)	44,4	9,5	4,5	58,4
TOC-Eintrag (10^6 t/Jahr)	1,78	0,1	0,015	1,8
Sedimenteintrag durch Flüsse (10^6 t/Jahr) ¹	-	-	-	28,1
TOC-Eintrag durch Flüsse (10^6 t/Jahr) ²	-	-	-	6,8

¹Sedimenteintrag durch Flüsse nach HOLMES et al. (2002), ²TOC-Eintrag durch Flüsse nach GORDEEV (2000).



(a)



(b)

Abb. 4.9-4: Anthropogene Beeinflussung der Permafroststabilität: (a) Haus auf Pfeilern in Tiksi, (b) Küstenerosion in der sibirischen Barents-See (Foto b: Stanislav Ogorodov).

Schlussbetrachtung

Die Permafrostlandschaften der Arktis sind durch klimabedingte morphologische Veränderungen geprägt. Verschiedene Landschaftsformen sind eng mit der Bildung von Permafrost und andere mit der Zerstörung von Permafrost verbunden. In Gebieten, die von eisreichem Permafrost dominiert werden, wirken sich Klimaerwärmungen verstärkend auf Degradationsprozesse wie Thermokarst, Thermoerosion und Küstenrückgang aus. Das hat Landverluste, Absenkungen der Oberfläche und erhöhte Wasseransammlung in Senken und eine weitere

Verstärkung der Permafrostdegradation zur Folge. Aktivitäten des Menschen führen zusätzlich zu einer stärkeren Störung des thermischen Gleichgewichts im gefrorenen Boden, in deren Folge Bauwerke zerstört werden können. Die für die Zukunft prognostizierte und bereits eingesetzte Klimaerwärmung bewirkt generell die Erhöhung der Bodentemperatur und eine Vergrößerung der Auftautiefe. Bei gleichzeitig erhöhten Niederschlägen und/oder Schmelzwasseransammlungen wird es zur Intensivierung von Thermokarstprozessen, weiteren Oberflächenabsenkungen und zu einer weit reichenden Versumpfung von Permafrostgebieten kommen ♦